



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LEPENÍ PLECHŮ A JEJICH TESTOVÁNÍ  
SHEETS BONDING AND THEIR TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jan Straka

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

BRNO 2017



## **Zadání bakalářské práce**

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Straka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Lepení plechů a jejich testování**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Se zadaným výběrem materiálů a lepidla provést jejich spojení lepením a následně jejich testování. Zpracovat přehled současných metod testování lepených plechů z odborné literatury, zvolit testovací metodu a lepený spoj vyhodnotit.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Přehled zkoušek lepených plechů z odborné literatury a norem, případně zjištěním z průmyslové praxe. Provedení experimentu s lepeným spojem a jeho vyhodnocení.

#### **Seznam doporučené literatury:**

BROCKMANN, Walter. Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley-VCH, c2009. ISBN 978-3-527-31898-8.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technológia tvárenia. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, c2004. ISBN 0831131829.

VOJTĚCH, Dalibor. Materiály a jejich mezní stavy. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-8-7080-741-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

STRAKA Jan: Lepení plechů a jejich testování.

---

Cílem této bakalářské práce je navržení vybraných zátěžových zkoušek pro lepené spoje u zadaného ocelového plechu DC01 v laboratorních podmínkách a porovnání pevnosti odmaštěných spojů technickým lihem a neodmaštěných spojů. V práci jsou představeny základní metody spojování tenkých plechů. Dále je uveden přehled testovacích metod pro plechy spojené lepením dle příslušných technických norem. Výsledkem vybraných zkoušek jsou konkrétní číselné hodnoty, které byly porovnány s údaji uváděnými výrobcem konkrétního lepidla.

Klíčová slova: Lepení, lepený spoj, zátěžové zkoušky, tenký plech

## **ABSTRACT**

STRAKA Jan: Sheets bonding and their testing.

---

The aim of this bachelor thesis is to design selected load tests for bonded joints at specified steel sheet DC01 under laboratory conditions and to compare the strength of the degreased joints with technical alcohol and uncrushed joints. The basic methods of joining thin sheets are presented in the thesis. The following is an overview of test methods for bonded sheets according to the relevant technical standards. The results of the selected tests are the specific numerical values that have been compared with those reported by the manufacturer of the particular adhesive.

Keywords: Bonding, adhesive bonding, load tests, thin steel sheet

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STRAKA, Jan. *Lepení plechů a jejich testování*. Brno, 2017. 34s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 20.5.2017

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Děkuji i mé rodině za podporu během celého studia. Poděkování patří i VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou za umožnění provedení experimentů.



## OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

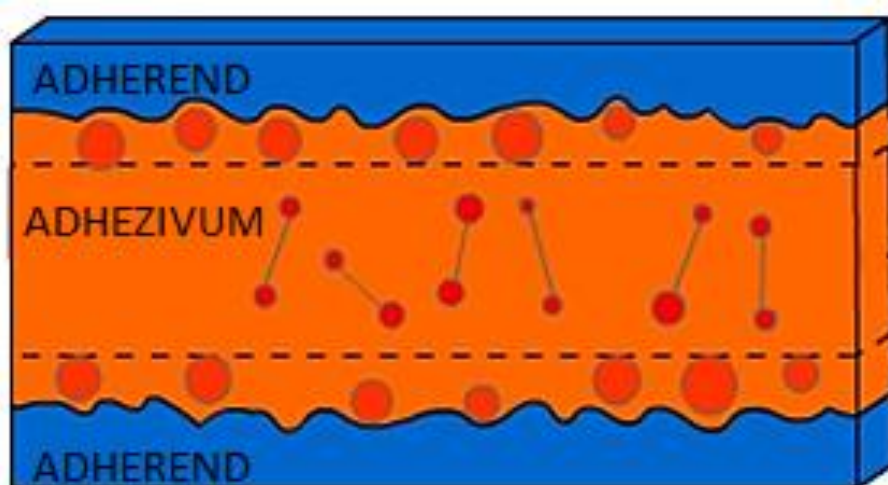
ÚVOD.....	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ .....	11
1.1 Metody spojování tenkých plechů .....	11
1.1.1 Šroubové spoje .....	11
1.1.2 Nýtování plechů .....	12
1.1.3 Bodové svařování plechů .....	13
1.1.4 Pájení plechových spojů .....	13
1.1.4 Clinchování plechů .....	14
1.1.4 Lepení plechů .....	14
2 TECHNOLOGIE LEPENÍ A TESTOVÁNÍ PLECHŮ.....	15
2.1 Výhody lepených spojů .....	15
2.2 Nevýhody lepených spojů .....	16
2.3 Možná provedení spojení plechů lepením .....	17
2.4 Příprava povrchů kovových plechů před lepením dle ČSN EN 13887 .....	17
2.5 Kontrola a zkoušky lepidel a lepených spojů .....	18
2.5.1 T - zkouška na odlup dle ČSN EN ISO 11339-2010.....	18
2.5.2 Cyklické zatěžování ve smyku dle ISO 9664:1993 .....	19
2.5.3 Zkouška na odlup pod úhlem 90° dle ČSN EN 28510-1.....	20
2.5.4 Zkouška na odlup pod úhlem 180° dle ČSN EN 1465 .....	21
2.5.5 Zkouška pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465 .....	23
2.5.6 Zkouška lámavosti dle ČSN 66 8511 .....	24
2.5 Označení hlavních typů porušení lepeného spoje .....	24
3 EXPERIMENTÁLNÍ PROVEDENÍ NAVRŽENÝCH ZKOUŠEK.....	26
3.1 Materiál použitý pro výrobu zkušebních vzorků .....	26
3.2 Lepidlo Den Braven Unifix MS Polymer.....	26
3.3 Lepidlo WEICON Flex 310M HT200 .....	26
3.4 Tahové zařízení PROMI 3001.....	27
3.5 Návrh a provedení vybraných zátěžových zkoušek .....	27
3.5.1 Zkouška pevnosti ve smyku .....	28
3.5.1 Zkouška lámavosti.....	30
4 ZÁVĚRY .....	33

Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	

## ÚVOD

V poslední době se projevuje nárůst požadavků strojírenského průmyslu na rychlé, ekonomické a pevné spojování materiálů. Tyto požadavky a potřeby se také projevují i v oblasti spojování plechů. Vznikají nové způsoby, jak rychle a jednoduše spojovat plechy. Doposud používané technologie k tomu přestávají být dostačující, ať už z hlediska časové úspory nebo technologické náročnosti. Klasickými metodami spojování plechů jsou například nejrůznější šroubová spojení, pájení, bodové svařování či spojení tvářením za studena. Neustále jsou vyvíjeny nové technologie, u nichž je zohledněna variabilita, jednoduchost použití a rychlost. Důležité je dbát při použití jakékoliv technologie spojování plechů na ekonomičnost výroby, neustálé zvyšování kvality a životnosti spoje.

Stále používanější technologií pro spojování součástí se stává lepení, které se v posledních letech poměrně rozšířilo. Neustálý výzkum a vývoj lepidel přináší stále nové a širší možnosti uplatnění těchto produktů v praxi. Největší využití technologie lepení v praxi lze najít především v automobilovém průmyslu, kde je třeba rychle a kvalitně spojovat plechové dílce a je požadováno tlumení vibrací a hluku. Důvodem rozšíření aplikace lepidel ve výrobě je skutečnost, že mají mnohé výhody ve srovnání s jinými způsoby spojování.



Obr. 1 Princip lepeného spoje [4]

# 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Zadáním této práce je vytvořit přehled zkoušek pro testování tenkých plechů spojených technologií lepením. Přehled zkoušek má být vytvořen s využitím odborné literatury a dostupných technických norem, případně z průmyslové praxe.

Následně mají být vybrány dvě zkoušky a jejich provedení se zadaným materiálem a lepidly. Na základě realizace těchto zkoušek bude provedeno srovnání pevnosti vzorků s odmaštěným povrchem a vzorků s neodmaštěným povrchem.

Technologické vlastnosti lepeného spoje budou testovány na vzorcích ze stejného materiálu, a to z oceli DC01 o tloušťce 1,5 mm. Pro každou zkoušku bude použito lepidlo od různých výrobců, s rozdílnými vlastnostmi.

Jako první z dvou experimentů bude provedena zkouška pevnosti ve smyku. Tato zkouška ověří odolnost překládaného lepeného spoje přes sebe ve smyku. Zkouška bude provedena na odmaštěných vzorcích technickým lihem a na vzorcích neodmaštěných. Lepidlo použité pro zkoušku je Den Braven UNIFIX MS Polymer.

Druhým experimentem bude zkouška lámavosti překládaného spoje přes sebe, kde bude měřen průhyb vzorku v závislosti na zatěžující síle. Také u této zkoušky budou testovány vzorky odmaštěné technickým lihem a vzorky neodmaštěné. Lepidlo použité pro tuto zkoušku bude WEICON Flex 310M HT200.

## 1.1 Metody spojování tenkých plechů [22, 13, 30, 27]

Ke vzájemnému spojení strojních součástí, které na sebe funkčně navazují, je třeba užít spojovacích prvků. Existuje celá řada metod spojení součástí k sobě. Hlavní snahou při navrhování strojů je snížit počet spojovacích dílů, jejichž cena není zanedbatelná. Výrobci se snaží inovovat a vymýšlet stále nové způsoby jakým spojit součásti, aby se snížily náklady na výrobu a montáž. Ke spojování plechů se používají různé moderní, ale i léty osvědčené technologie.

Pod pojmem "tenké plechy" se rozumí plech do tloušťky 3 mm. Práce se zabývá především bodovým spojováním tenkých plechů, tudíž technologie lemování a švového odporového svařování nebudou dále rozebírány. Tenké plechy je možno spojit pomocí šroubů, bodovým svařováním, pájením, nýtováním, clinchováním nebo lepením.

### 1.1.1 Šroubové spoje [13, 23, 30, 27]

Šroubové spoje patří mezi mimořádně důležité spojovací prvky. Jedná se o demontovatelné spojení součástí. Tyto spoje mohou být konstruovány buď s předpětím nebo bez (např. závěs háku jeřábu). Spojení je zpravidla uskutečněno pomocí 3 základních prvků - šroubu, matice a podložky. Šrouby je možno spojit části z různých materiálů a zároveň o různých tloušťkách.

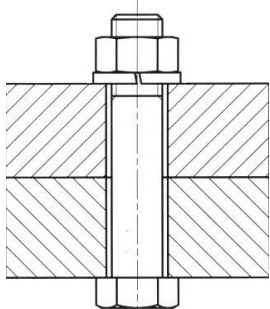
Pro spojování plechů se využívá několik základních typů šroubového spojení. Lze užít klasického způsobu spojení plechů pomocí šroubu a matice, případně s využitím podložek. Druhou možností spojení plechů je užití samovrtných šroubů, které mají místo špičky svůj vlastní vrták, kterým si zhotoví díru do materiálu. Na dřívku tohoto šroubu je závit, pomocí kterého se šroub zařízne do materiálu a tím ho spojí.



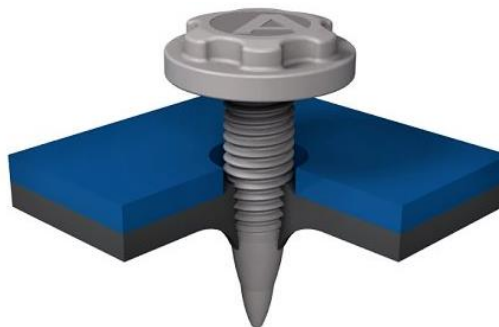
Obr. 2 Samovrtný šroub [23]

Dále se používají speciální tvářecí šrouby ve zcela specifických případech. Místo spoje se vlivem vysokých otáček šroubu a působením axiální síly zahřeje. Po průniku materiálem vytváří kuželový hrot šroubu v plechu závit, do kterého lze zašroubovat šroub s klasickým metrickým závitem.

Nevýhodou šroubových spojení je narušení základního materiálu vytvořenými otvory pro šrouby. Může tak dojít ke koncentraci napětí a snížení únosnosti celého spoje.



Obr. 3 Šroubové spojení [26]



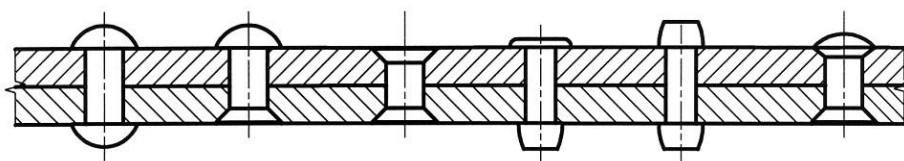
Obr. 4 Flowform tvářecí šroub [27]

### 1.1.2 Nýtování plechů [17, 30]

Jedná se o nerozebíratelný druh spojení. Nepřímý způsob nýtování se uskutečňuje pomocí samostatných nýtů. Přímý způsob nýtování se provede roznýtováním jedné ze spojovaných součástí vložené do díry v druhé součásti. Nýtování se hojně využívá v leteckém průmyslu. Snýtované spoje jsou zpravidla pevnější než lepené spoje, nejsou energeticky náročné, pružné. Lze nýtovat součásti s povrchovou úpravou a součásti z různých materiálů. Uvedený druh spojů lze nahradit například bodovým svařováním nebo šroubovým spojením.

Nýt se skládá z hlavy, dříku a závěrné hlavy. Nýtování za studena se provádí v případech, kde je průměr nýtu do 8 mm. V situaci, kdy má nýt větší průměr, nýtuje se za ohřevu.

Nýtovat lze například i lisováním, s trnem nebo pomocí rozpínacích nýtů.

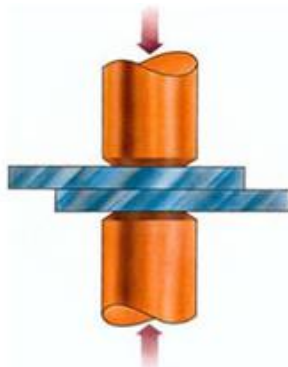


Obr. 5 Ukázka nýtových spojů [17]

### 1.1.3 Bodové svařování plechů [19, 30]

Bodovým svařováním se dosahuje trvalého spojení částí. Při svařování dochází k tepelnému namáhání základního materiálu. Toto má za následek vznik svarových napětí a deformací. Napětí mohou být teplotní nebo strukturní.

Bodové svařování plechů se provádí technologií odporového svařování. V místě svaru se plechy k sobě přitlačí, průchodem proudu se místo zahřeje a působením tepla a tlaku se součásti svaří. Odporové svařování je relativně rychlé, přesné a vytváří se stejnoměrný svar. U tohoto způsobu je možná poměrně jednoduchá automatizace celého procesu. Tato technologie má největší uplatnění v automobilovém průmyslu.



Obr. 6 Schéma bodového svařování [19]

### 1.1.4 Pájení plechových spojů [21, 30]

Spojení dvou zpravidla kovových součástí uskutečněné pomocí roztaveného kovu. Roztavený spojovací kov - pájka přilne difuzí k základnímu materiálu, obvykle bez jeho roztavení. Rozděluje se na tvrdé a měkké pájení, popř. vysokoteplotní, dle použitého přídavného materiálu. Spoj je těsný, pevný a elektricky vodivý. Často se využívá tavidel nebo ochranných plynů.

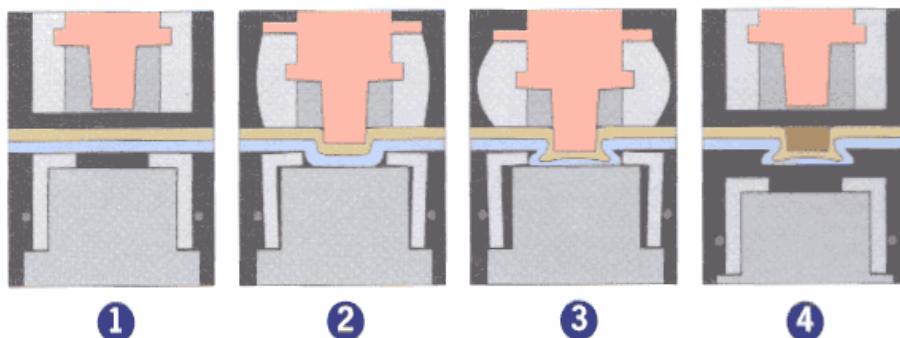
Pájení může být provedeno jako nánosové, ponorem, plamenem, s pomocí pájedla nebo s vloženou pájkou.



Obr. 7 Pájení tenkých plechů [21]

#### 1.1.4 Clinchování plechů [3, 30]

Jedná se o metodu spojování plechů tvářením za studena. Efektivní způsob pro snížení nákladů na spojování plechů, na rozdíl od bodového svařování, nýtování nebo šroubového spojení. Princip je takový, že speciální nástroje do sebe zalisují a plastickou deformací spojovaného materiálu mechanicky spojí plechy, jak lze vidět na obrázku 8. Spoj je vytvořen bez přídavných spojovacích prvků. Výsledkem je nerozebíratelný spoj bez otřepů a hran. Nedochozí zde k negativnímu ovlivnění spojovaného materiálu.



Obr. 8 Princip clinchování [3]

#### 1.1.4 Lepení plechů [22, 13]

Jedná se o pevné spojení součástí s využitím přídavného materiálu, tj. lepidla. Lepidlo při procesu tuhnutí adhezně přilne ke spojovaným součástem. Lepené spoje se používají především v těch aplikacích, kde není vhodné využít klasické způsoby spojování součástí. Lepení se hojně využívá v automobilovém průmyslu, kde se využívá tlumicích a těsnících vlastností syntetických lepidel, jak lze vidět na obrázku 9.



Obr. 9 Aplikace lepidla v automobilovém průmyslu [2]

## **2 TECHNOLOGIE LEPENÍ A TESTOVÁNÍ PLECHŮ [13, 22]**

Technologie lepení doplňuje klasické metody spojování součástí. Lepení nemůže plnohodnotně nahradit technologii svařování z hlediska pevnosti spoje. V praxi lze užít jejich kombinaci. Lepení se používá především v případech, kdy nelze využít jiné metody spojování, případně z ekonomického hlediska.

Lepidla vyvinutá v poslední době vykazují zvýšenou únosnost spojů a zároveň je jejich užití v praxi ekologicky nezávadné.

Možnosti aplikace lepidel jsou široké a jejich rozsah se neustále zvětšuje. Využití technologie lepení ovlivňuje výrobu velkého množství konstrukcí, strojů a zařízení.

Využívá se v případech, kdy nelze základní materiál ovlivňovat zahříváním nebo pokud není možné v daném případě vrtat do materiálu otvory pro šrouby nebo nýty. Důležitým kritériem pro použití lepidel v praxi je možnost spojit materiály se zcela odlišnými vlastnostmi.

### **2.1 Výhody lepených spojů [14, 22, 13, 16]**

Každá technologie spojování součástí má své výhody i nevýhody, stejně tak i technologie lepení. Ty určují vhodnost konstrukce pro lepení a omezují použití této technologie pouze na některé případy.

Výhody lepených spojů:

- dostatečná pevnost,
- vyhovující poruchová bezpečnost,
- malé výrobní náklady,
- vysoká odolnost spoje proti korozi,
- těsnost spoje,
- nízká drsnost vnějších povrchů,
- spojování i velmi tenkých materiálů,
- výroba spojů s dobrou tepelnou, elektrickou nebo zvukovou izolací,
- výroba spojů s dobrou elektrickou vodivostí,
- tlumení vibrací,
- spojování velkých ploch,
- nízká hmotnost,
- ve většině případů spojení za nízkých teplot bez vytvrzování a ovlivnění materiálu,
- úspora lícování,
- bezúdržbové.

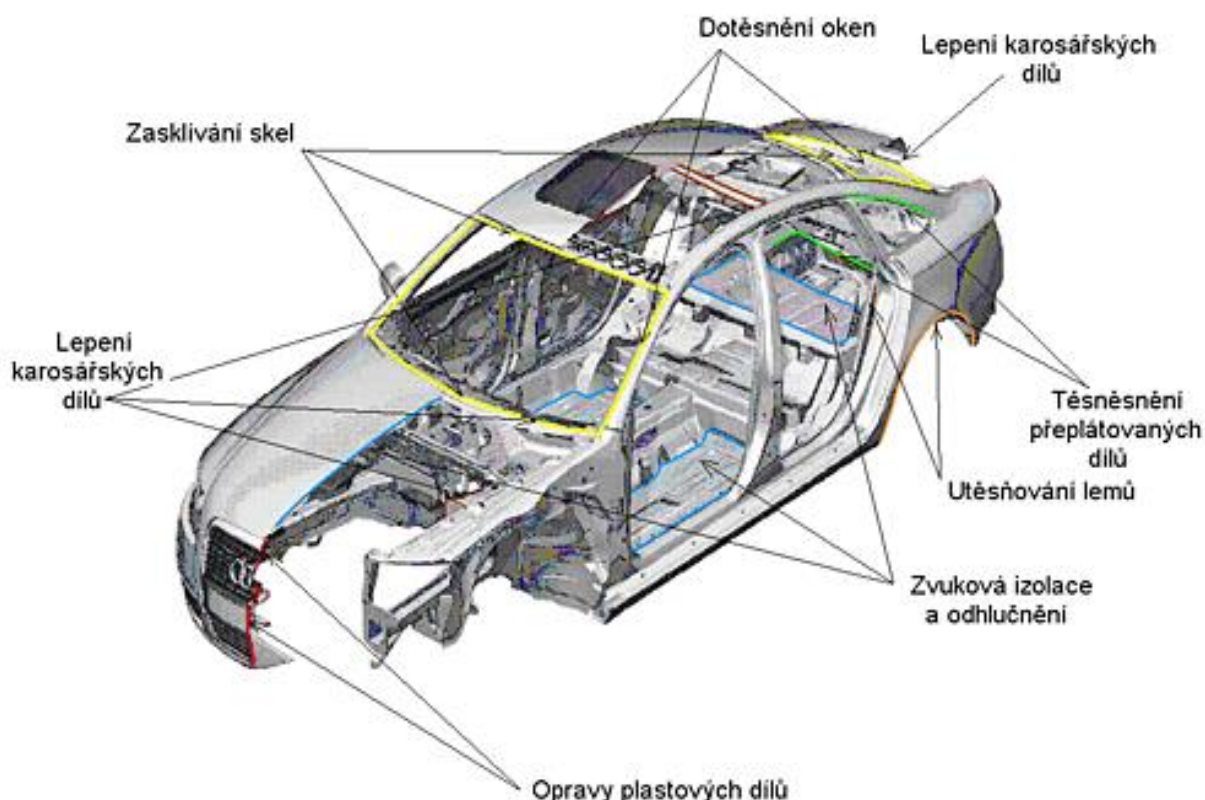
Největší výhoda lepených spojů, ve srovnání s klasickými metodami spojování, je zvýšení pevnosti vhodně zkonstruovaného spoje. Pro nýty nebo šrouby je třeba vrtat otvory do materiálu. Tyto otvory jsou koncentrátoři napětí a snižují pevnost celého spoje. Pevnost lepených a svařovaných spojů nelze přímo jednoduše porovnat, záleží totiž na spojovaném materiálu, druhu zatížení a konstrukčním uspořádání spoje. Větší uplatnění lepení je u lehkých slitin a u neželezných kovů. U ocelí je značně více případů než u jiných materiálů, kdy je svařovaný spoj pevnější než spoj lepený.

Další výhodou lepených spojů je možnost spojení různých druhů konstrukčních materiálů, jejichž spojení nelze provést jiným způsobem. Správně navržené lepené spoje přináší výrazné snížení hmotnosti celé konstrukce.



Jedna z mnoha výhod lepidel na bázi polymerů je tlumící vlastnost, jež se využívá hojně v konstrukci automobilů z důvodu tlumení hluku a vibrací, jak lze vidět na obrázku 10.

V porovnání s nýtovanými nebo svařovanými spoji je zajištěna vysoká rovnoměrnost rozdělení zatížení. Touto technologií lze spojovat i velmi tenké plechy, které jsou problematické tím, že se deformují při nýtování nebo svařování.



Obr. 10 Uplatnění lepidel a tmelů v konstrukci osobního automobilu [18]

## 2.2 Nevýhody lepených spojů [14, 22, 13, 16]

Při slepování součástí je důležité dbát na přípravu povrchu spojovaných součástí. Toto způsobuje zvýšení časové náročnosti výroby. Další faktor, který ovlivňuje dobu nutnou pro montáž, je čas potřebný pro vytvrzení lepidla ve spoji. Doba pro vytvrzení může být od několika sekund až po několik hodin.

Je zde nutnost použití odmašťovačů, která by měla být ekologicky nezávadná. Některá lepidla mohou být také nevhodná z ekologických hledisek. U lepidel je nemožná recyklace.

Jednou z nevýhod pro součásti spojené touto technologií je, že takový spoj není vhodné namáhat normálovým a dynamickým zatěžováním.

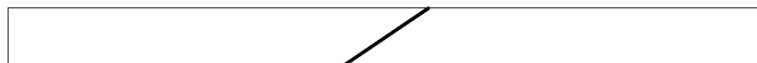
Další nevýhody lepených spojů jsou nedostatečná odolnost proti odloupenutí, malá odolnost proti zvýšení teploty, nutnost úpravy styčných ploch před lepením, ve většině případů nutnost užití vytvrzovacích přípravků, časy nutné pro vytvrzení, náchylnost ke creepu (pomalá trvalá deformace při vystavení mech. napětí v elastické oblasti), nevhodné do agresivního prostředí a spoje je bez možnosti demontáže.



## 2.3 Možná provedení spojení plechů lepením [22]

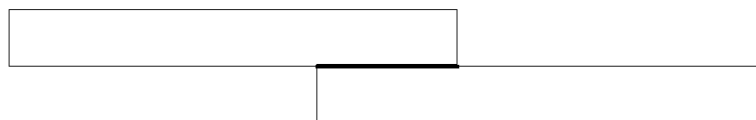
Existuje více možností, jakým způsobem se dají plechy uspořádat při lepení. Jednou s možností je spojení na tupo, kdy jsou obě čelní plochy kolmo zarovnané vzhledem k podélné ose spojovaných součástí. Toto spojení je realizovatelné pouze u tyčových polotovarů nebo u plechů o větších tloušťkách. Vhodnější možnosti uspořádání plechů jsou znázorněny na obrázcích 11, 12 a 13.

- a) spoj na tupo se zkosením - nevhodný pro spojování plechů, z důvodu malé kontaktní plochy



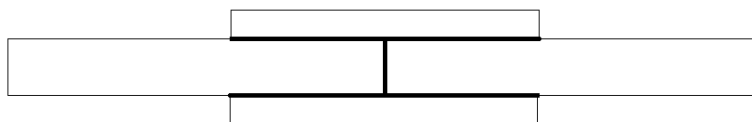
Obr. 11 Spoj na tupo se zkosením

- b) spoj přeplátováním přes sebe - vhodný pro plechy, větší kontaktní plochy než u spoje na tupo



Obr. 12 Spoj s přeplátováním přes sebe

- c) spoj s jednostranným nebo oboustranným přeplátováním v kombinaci se spojem na tupo - velice vhodné pro plechy díky velké kontaktní ploše



Obr. 13 Spoj s oboustranným přeplátováním

## 2.4 Příprava povrchů kovových plechů před lepením dle ČSN EN 13887 [4]

Pro dosažení optimální životnosti spoje v atmosférických podmínkách se skládá postup přípravy povrchu ze tří základních kroků:

- odstranění znečišťujících látek
- fyzikální modifikace povrchu
- chemické působení

Vhodnost povrchů materiálů pro lepení závisí na přípravě povrchu, typu spoje, na funkci a na okolních podmínkách, kterým je spoj vystaven. Vhodně připravené povrchy kovových součástí (plechů) lze uspokojivě lepit. Kvůli prodloužení životnosti spoje se zavádí komplexnější a progresivnější metody úprav povrchů.

Některá lepidla mají schopnost rozpouštět lehké oleje a některé polymerní látky. Pro tato speciální lepidla ve většině případů není nutná žádná speciální příprava povrchu, pokud není daný spoj namáhán výrazným zatěžováním.

Některé z metod chemických a fyzikálních úprav povrchů mohou být nebezpečné z důvodu použití chemických látek. Při jejich užívání je důležité dodržovat bezpečnostní předpisy. Následně je vyžadována ekologická likvidace použitých sloučenin.

Modifikace povrchu určených k lepení může být anorganická nebo organická, popř. kombinací obojího. S plochami určenými pro spojování lepením je doporučeno manipulovat co možná nejméně. Po přípravě se nic nesmí dotýkat upravovaných povrchů.

Odstranění zbytků olejů a mastnot je vhodné provádět přípravky na bázi vody. Pro kovy je vhodné užívat alkalické čisticí prostředky, které odstraňují i mýdla a soli. Některé přípravky se užívají za zvýšené teploty, jiné vyžadují průchod elektrického proudu. Pro čištění malých dílců je vhodné použití ultrazvukových čističek. Po očištění povrchu jakýmkoliv činidlem je důležitý oplach vodou a řádné vysušení proudem teplého vzduchu.

Povrchy by měly být lepeny, pokud možno, co nejdříve po očištění, protože dochází k opětovné oxidaci. Pokud není možné lepení provádět ihned po očištění, musí být součásti uchovány v takovém prostředí, aby k oxidaci nedocházelo.

Pro dosažení kvalitního spoje je vhodné aplikovat mírné zdrsnění povrchu. Dosáhnout ho lze odíráním nebo otryskáním. V některých případech se touto mechanickou úpravou odstraňuje oxidace či koroze. Při mechanických úpravách povrchů je třeba dbát na to, aby nedošlo k nadměrnému narušení povrchu součástí, což by způsobilo koncentraci napětí.

Pro přípravu ocelových povrchů je doporučen tento postup: 1. odmaštění, 2. mírné zdrsnění povrchu, 3. lepení. Povrchy je vhodné slepit do 4 hodin po úpravě povrchu pro dosažení optimální pevnosti spoje. Dále lze do procesu přípravy povrchu ocelových plechů zařadit různé leptací prostředky, popřípadě opatřit povrch základním nátěrem kompatibilním s použitým lepidlem.

## **2.5 Kontrola a zkoušky lepidel a lepených spojů [14]**

Na začátku celého procesu spojování součástí lepením se koná vstupní kontrola lepidel. Provádí se jak při přijetí lepidla do firmy, tak i před zahájením výroby. Provádí se vzhledová kontrola produktu. Dále se konají analytické zkoušky lepidel (pro stanovení např. epoxyskupin), fyzikálně - chemické zkoušky pro stanovení například viskozity a vybrané mechanicko-fyzikální zkoušky lepených spojů. Rozsah zkoušek je určen technickými předpisy každého lepidla a dále technologickým postupem.

Kontrola procesu lepení zahrnuje řadu zkoušek pro dodržení dané technologie. Zkoušky závisí na technologickém postupu, podle kterého se také volí. Destruktivní zkoušky mohou být prováděny na vzorcích z technologických přísadků nebo na vzorcích lepených ve zvláštních přípravcích.

Vzorky z technologických přísadků jsou připraveny odříznutím technologického přísadku přímo ze slepovaných součástí a na něm se vykoná příslušná zkouška. Zkouška pevnosti je nutná v souvislosti s hodnotou provozního namáhání. Vzorky projdou společně s lepeným dílem celým procesem, včetně vytvrzování. Tyto vzorky nelze připravit u všech lepených dílů.

Vzorky lepené ve zvláštních přípravcích jsou lepeny souběžně s vyráběnými slepovanými díly. Ovšem na rozdíl od vzorků z technologických přísadků mohou nastat určité rozdíly v pevnosti vzorků a vyráběných součástí. Výhodou je možnost zhotovení více vzorků současně. Obvykle se testují na pevnost ve smyku a pevnost v odlupování.

### **2.5.1 T - zkouška na odlup dle ČSN EN ISO 11339-2010 [8]**

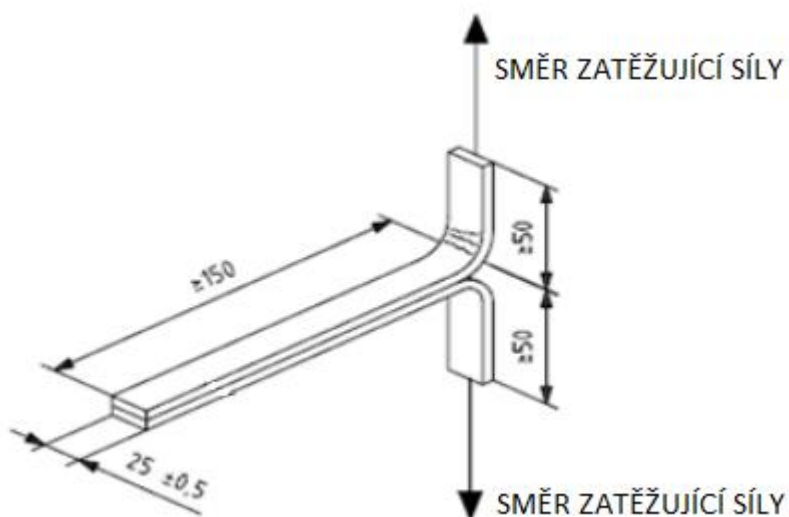
Tato zkouška se zaměřuje na zjištění síly potřebné k odloupení vzorků ve tvaru T. Původně byla tato metoda navržena pro kovové materiály, ale lze ji využít i pro pružné materiály. Podmínkou je, že vzorky musí být ohnuty pod úhlem 90°.

Při T-zkoušce na odlup jsou lepené vzorky uchyceny do čelistí zkušebního stroje za volné konce. Úhel mezi osou působení zátěžné síly a lepenou rovinou nesmí být ničím zajištěn proti deformaci.

Zátěžový test se provádí v přístroji pro tahovou zkoušku, který je schopný působit konstantní rychlostí zatěžování. Doporučená rychlost je 10 mm/min. Vzorek by měl být upnut v samosvorných čelistech za volný konec. Doporučená vzdálenost uchycení je přibližně 25 mm. Upnutí by mělo být uskutečněno tak, aby na vzorek nepůsobilo žádné přídavné napětí, kromě zkušební. Měřicí zařízení zátěžné síly by mělo pracovat s přesností  $\pm 2\%$  celkové síly.

Rozměry zkušební vzorku by měly být dle následujícího obr. 14. Povrch zkoušených dílů by měl být připraven dle normy ČSN EN 13887. Lepidlo by mělo být nanášeno a vytvrzeno dle pokynů výrobce, pro zajištění optimálních podmínek s minimálními odchylkami u jednotlivých vzorků. Při testování více druhů lepidel by měly být adherendy identické, také zatěžovací proces by měl být pro všechny vzorky identický, k dosažení objektivních výsledků.

Do protokolu o zkoušce je nutno zaznamenat testovací podmínky, úpravy povrchů, druhy lepidel a síly nutné k odloupení vzorků.



Obr. 14 Vzorek pro T-zkoušku na odlup [8]

### 2.5.2 Cyklické zatěžování ve smyku dle ISO 9664:1993 [12]

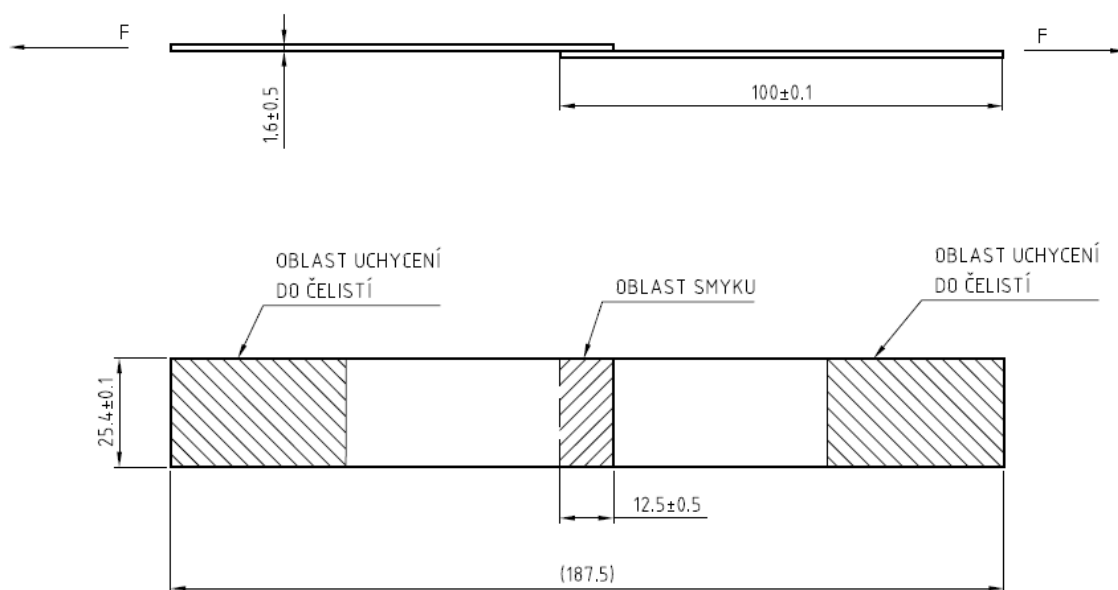
Zkušební těleso je cyklicky zatěžováno tak, aby výsledné napětí bylo superpozicí statického (středního) napětí a pulzujícího napětí v tahu. Z počtu cyklů do porušení vzorku a příslušných napětí se sestrojí diagram únavových křivek, ze kterého lze odečíst oblast spolehlivosti pro daný spoj.

Zkušební vzorky by měly být připravovány v šabloně, aby byla zajištěna jejich identičnost. Zkouška se provádí na únavovém zkušebním přístroji. Toto zařízení musí být schopno vyvíjet sinusoidní zatížení, které se má pohybovat mezi 10% až 80% rozsahu stupnice. Zkušební frekvence musí být 30 Hz, pokud není určeno jinak. Maximální zatěžovací frekvence je povolena 60 Hz, aby nedošlo k zahřívání spoje. Upnutí vzorku do zařízení musí být provedeno tak, aby na zkušební těleso nepůsobilo žádné přídavné napětí. Působící síla musí mít shodný směr s hlavní osou zkušební tělesa.

Rozměry a tvar spojení adherendů musí odpovídat geometrii znázorněné na následujícím obrázku 16.

Při přípravě vzorků je třeba dbát na jejich dokonalé souosé vyrovnaní a homogenitu spoje. Při testování více vzorků je třeba dbát na to, aby vrstva nanesení lepidla byla u všech vzorků shodná. Příprava povrchu musí být provedena dle normy ČSN EN 13887. Lepidlo musí být aplikováno v souladu s návodem výrobce.

Počet zkušebních těles závisí na požadované přesnosti výsledků. Minimálně 4 vzorky se hodnotí při různých hodnotách střídavého napětí, tak aby k přerušení spoje došlo mezi  $10^4$  a  $10^6$  cyklů. Pro statické stanovení časované meze únavy při  $10^6$  kmitech je zapotřebí nejméně 12 těles.



Obr. 15 Nákres zkušebního vzorku [9]

### 2.5.3 Zkouška na odlup pod úhlem 90° dle ČSN EN 28510-1 [7]

Tato zkouška se používá především pro vzorky, kde jeden z adherendů je pružný. Tato zkouška je vhodná také pro křehké materiály, které praskají, lámou se nebo se u nich objevují delaminační poškození při zkoušce na odlup při 180°.

Připravený vzorek ze dvou adherendů je roztrhnut konstantní rychlostí v testovacím zařízení. Zkouška probíhá až do úplného rozdělení adherendů. Působící síla by měla být přibližně normálová k rovině slepu.

Zařízení, ve kterém se provádí tato zkouška, je klasický přístroj pro provádění tahových zkoušek. Přístroj musí být vybaven samosvornými čelistmi, které zvyšují sílu upnutí vzorku se zvyšující se zátěžnou silou. Součástí zařízení musí být siloměr se záznamem naměřených hodnot. Zaznamenaná síla, by se neměla od skutečné síly lišit o více než 2%. Reakční doba měřicího zařízení by měla být dostatečně krátká, aby nedocházelo k ovlivnění měření. Síla potřebná pro přetržení vzorku by měla ležet v intervalu mezi 10 až 80% měřicího rozsahu zařízení.

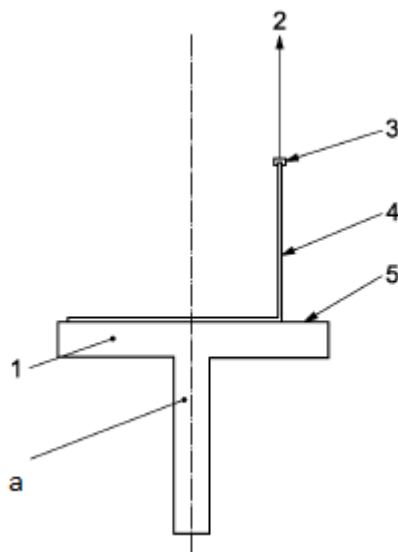
Adherendy by měly být dostatečně tlusté, aby odolaly a nedeformovaly se při působení zatěžovací síly potřebné pro přetrhnutí vzorku. Doporučené tloušťky jsou: plech - 1,5 mm, plast - 1,5 mm, dřevo - 3 mm, guma - 2 mm. Jiné tloušťky mohou být dle potřeb a konkrétních podmínek pro montáž.

Plocha pro lepení pevného adherendu by měla mít rozměry minimálně 25x150 mm. Volný konec je ohnut pod úhlem 90°, kvůli uchycení do přístroje. Tento vzorek se nalepí na speciální T-součást, která má rozměry 75x25x10 mm. Tato T-součást je upnuta ve spodní čelisti zkušebního zařízení a měla by být dostatečně tuhá, aby odolala deformaci.

Rozměry pružného adherendu by měly být minimálně 250 x 25 mm. Konec pružného vzorku by měl být ohnut o něco více než na 90°, s ohledem na odpružení materiálu při zkoušce.

Mělo by být provedeno 5 zkoušek, aby byl výsledek objektivní. Všechny testovací vzorky by měly být připraveny identicky, aby nedošlo k odchylkám při měření. Úprava povrchu spoje by měla být provedena dle normy ČSN EN 13887 nebo dle návodu výrobce lepidla.

Stopka T-součásti se upíná do spodní čelisti, popřípadě do čelisti, na kterou není připojen siloměr. Osa zatěžování by měla procházet středem lepené plochy. Volný konec ohnutého adherendu je upnut pomocí lanka nebo struny k pohyblivé čelisti s měřicím zařízením. Potom se zařízení uvede do pohybu. Doporučená rychlost zatěžování pro tuto zkoušku je 50 mm/min. Do výsledného protokolu se zaznamenává maximální síla potřebná pro přetržení vzorku, popř. graf zatěžování (pokud je zařízení schopné ho vykreslit).



a-stopka pro uchycení do čelistí, 1-pevná T-součást, 2-ocelové tahací lanko, 3-uchycení lanka, 4-volná ohnutá část vzorku, 5-rovina lepeného spoje

Obr. 16 Schéma zkušebního vzorku s T-součástí [7]

#### 2.5.4 Zkouška na odlup pod úhlem 180° dle ČSN EN 1465 [11]

Tato zkouška je určena pro testování vzorků na odlup pod úhlem 180°, kde jeden adherend je pevný a druhý je pružný.

Vzorek je v testovacím zařízení zatěžován konstantní rychlostí. Zkouška probíhá až do úplného porušení spoje.

Zařízení pro tuto zkoušku je přístroj k provádění tahových zkoušek. Přístroj musí být vybaven samosvornými čelistmi, které zvyšují sílu upnutí vzorku se zvyšující se zátěžnou silou. Součástí zařízení je siloměr se záznamem naměřených hodnot. Zaznamenaná síla, by se neměla od skutečné síly lišit o více než 2%. Reakční doba měřicího zařízení má být dostatečně krátká, aby nedocházelo k ovlivnění měření. Síla potřebná pro přetržení vzorku se má se nacházet v intervalu mezi 10-80% měřicího rozsahu zařízení.

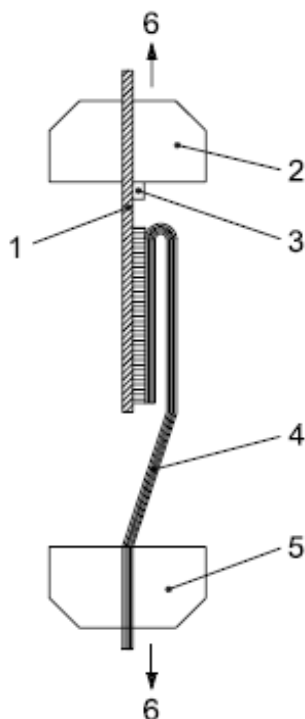
Uchycení vzorku v čelistech by mělo být provedeno tak, aby zatěžující síla nepůsobila přímo v podélné ose slepu, ale aby nositelka této síly procházela paralelně vedle této osy.

Tloušťka adherendů by měla být volena tak, aby odolaly zátěžné síle bez výrazné deformace. Doporučené tloušťky pro různé materiály jsou stejné jako u předchozí zkoušky.

Pevný adherend by měl být zhotoven z plechu o šířce 25 mm a minimální délce 200 mm. Pružný adherend musí vydržet ohnutí o 180° bez výrazné rozměrové deformace nebo porušení. Délka pružné části vzorku by měla být minimálně 350 mm. Šířka by měla být nejméně stejně velká jako u pevného adherendu, výjimečně pro některé materiály širší o 5 mm na každé straně.

Příprava všech vzorků by měla být shodná a v souladu s návodem výrobce lepidla nebo dle normy ISO 13887. Lepidlo má být vždy nanášeno dle návodu výrobce. Minimální počet testovaných vzorků je pět.

Pevný adherend by měl být chycen v pevné čelisti testovacího zařízení, pružný adherend se upíná do pohyblivé čelisti. Je důležité dbát na správné zapolohování vzorku do zařízení. Doporučená rychlost zatěžování je 100 mm/min nebo dle potřeby a podmínek užití daného typu spoje v provozu. Průběh síly při zatěžování se zaznamenává a také druh porušení lepeného spoje.



1-pevný adherend, 2-pohyblivá čelist, 3-polohovací kolík, 4-pružný adherend, 5-pevná nepohyblivá čelist, 6-směr zatěžující síly

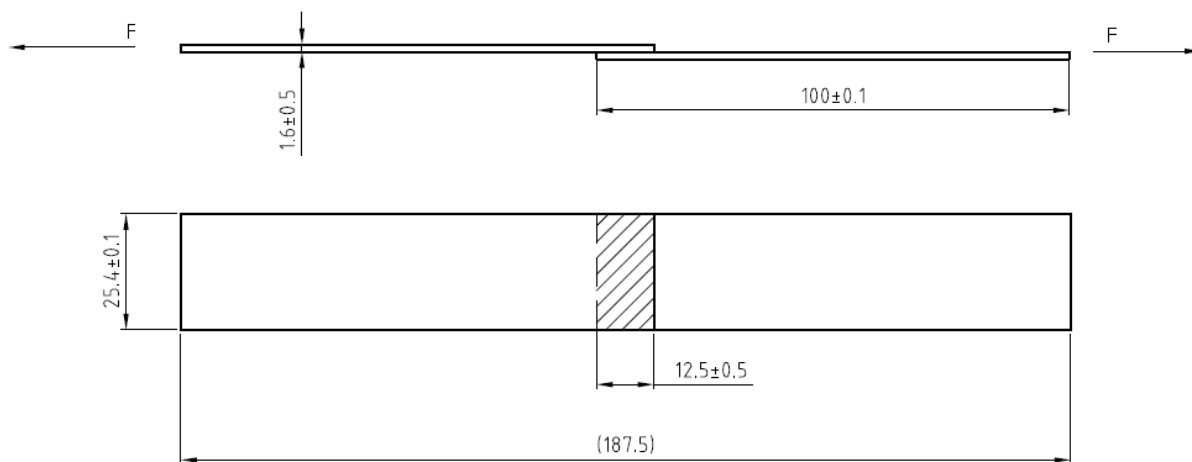
Obr. 17 Schéma vzorku pro zkoušku na odlup pod 180° [11]

### 2.5.5 Zkouška pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465 [14, 5]

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 1465 (66 8510). Zkouška spočívá v namáhání spoje smykovým napětím statickým tahem. Zatěžování probíhá ve směru podélné osy až do úplného porušení zkušební vzorku. V průběhu zkoušky měříme sílu vyvíjenou zkušebním zařízením. Zaznamenává se největší hodnota síly, kterou jsme naměřili do porušení vzorku. Pevnost ve smyku se přepočítá na MPa.

Zkušebním zařízením pro tuto zkoušku je přístroj pro vykonávání tahových zkoušek. Musí být vybaven samosvornými čelistmi, které zvyšují sílu upnutí vzorku se zvětšující se zátěžnou silou. Důležité je dbát na správné upnutí vzorku do čelistí a vyrovnaní do osy zatěžování, aby na spoj nepůsobila žádná přídavná napětí, kromě zkušební. Rychlost zatěžování by měla být 10 mm/min. K porušení spoje by mělo dojít za  $65 \pm 20$  s. Zařízení pro záznam působící síly by mělo reagovat s dostatečně krátkou odezvou, aby nedošlo k odchylkám a nepřesnostem při měření.

Zkušební vzorek je lepen ze dvou plechů o šířce  $24,4 \pm 0,1$  mm a délce  $100 \pm 0,1$  mm. Tloušťka plechů pro testování by měla být  $1,6 \pm 0,1$  mm. Šířka překlátování spoje má být  $12,5 \pm 0,5$  mm. Povrch zkoušených vzorků musí být řádně upraven, očištěn a odmaštěn. Lepidlo se musí nanášet a vytvrzovat dle pokynů výrobce. Nejčastěji používaná tloušťka naneseného lepidla je 0,2 mm. Povrchy musí být upraveny v souladu s normou ČSN EN 13887. Počet zkoušených vzorků by měl být větší než 5 a volí se podle požadované přesnosti výsledků.



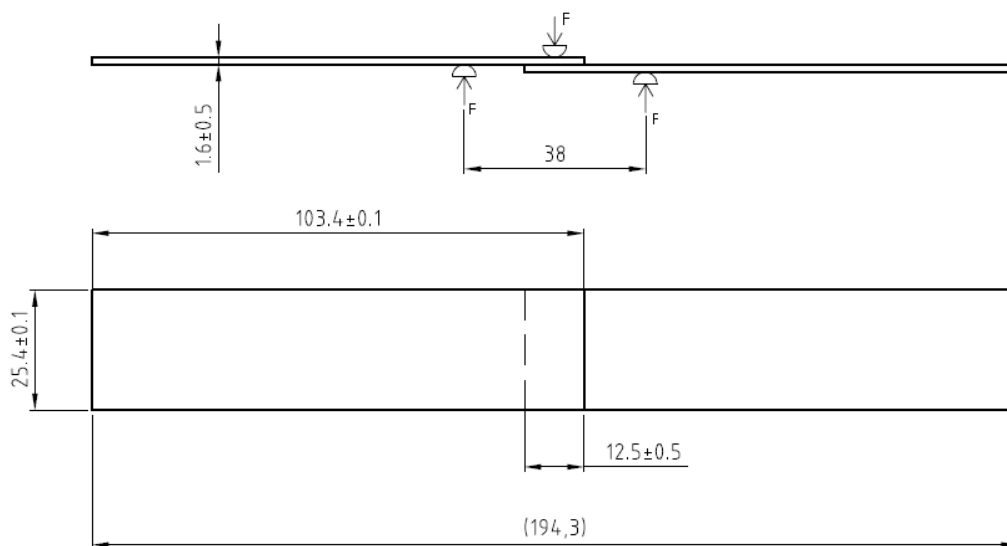
Obr. 18 Vzorek pro zkoušky pevnosti ve smyku [5]

### 2.5.6 Zkouška lámavosti dle ČSN 66 8511 [14, 5]

Zkouška se provádí dle normy ČSN 66 8511. Jedná se o namáhání zkušební vzorku na ohyb statickým zatěžováním. Zatížení při zlomení vzorku ve spoji se nazývá lámavost a udává se v N.

V průběhu zkoušky se postupně zvětšuje zatěžující síla  $F$  působící na střed spoje. Dále se průběžně měří a zapisuje hodnota průhybu vzorku vzhledem k vodorovné rovině, dané osovou rovinou zkušební vzorku.

Provedení zkoušky a náčrtek zkušební vzorku lze vidět na obrázku 19. Plechy jsou spojené překlátováním přes sebe. Šířka přeložení lepeného spoje je dána normou, a to  $12,5 \pm 0,5$  mm.



Obr. 19 Vzorek a uspořádání zkoušky lámavosti [14]

### 2.5 Označení hlavních typů porušení lepeného spoje [20]





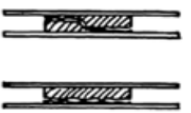
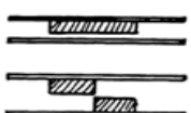

Pro lepší posouzení výsledku mechanické zkoušky adheze součástí spojených lepením se užívá klasifikace typů porušení lepeného spoje dle tabulky 1. V případě, že se na zkušebním vzorku objeví více typů poškození spoje, uvede se procentuální vyjádření jednotlivých druhů poškození. Vzorek se dvěma různými druhy poškození spoje je znázorněn na obrázku 20.



Obr. 20 Kombinované porušení spoje AF (50%)+CF (50%) [20]



Tab. 1 Označení typů porušení [20]

Místo porušení	Typ porušení	Označení poruchy
Základní materiál	Porušení 1 nebo 2 adherendů 	SF
	Porušení 1 adherendu 	CSF
	Delaminační porušení 	DF
Lepidlo	Kohezní porušení 	CF
	Speciální kohezní porušení 	SCF
	Adhezní porušení 	AF
	Kombinace adhezního a kohezního porušení 	ACFP

Při testování plechů spojených lepením může dojít k několika základním druhům poškození. První z možných defektů je, že samotný spoj odolá zatěžující síle, ale dojde k porušení adherendů. Adherend může být přetržen v jiném místě, než je samotný spoj. Další možné poškození je delaminační, což znamená, že dojde k odloupení vrstvy základního materiálu, jenž je v kontaktu s lepidlem. Tato vrstva může být například zinková na povlakovaných plechách. Tyto druhy poškození jsou nežádoucí a znamená to, že lepený spoj je kvalitnější než základní materiál.

Dále může dojít k poruše kohezního typu. Tento defekt je lehce rozpoznatelný tak, že po přetržení vzorku zůstane na obou částech vzorku zůstane lepidlo přilnuté k základnímu materiálu a lom prochází středem vrstvy lepidla.

Posledním typem poruchy je adhezivní porušení. Znamená to, že vrstva lepidla zůstane neporušená, pouze dojde k odloupení této vrstvy od základního materiálu. Příčinou může být špatně zdrsňený nebo neodmaštěný povrch vzorku. V určitých případech může nastat kombinace zmíněných poruch, jak je uvedeno v tabulce 1.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ PROVEDENÍ NAVRŽENÝCH ZKOUŠEK

Cílem práce je navržení a provedení vhodných zkoušek v laboratorních podmínkách pro ověření mechanických vlastností lepeného spoje. V této kapitole bude problematika probrána podrobněji.

#### 3.1 Materiál použitý pro výrobu zkušebních vzorků [28, 16, 24, 1]

Pro dané pokusy byl vybrán materiál DC01. Jedná se nízkouhlíkový ocelový plech o tloušťce 1,5 mm, válcovaný za studena. Materiál je vhodný pro tváření za studena a dále pro výrobky, u nichž se provádí následná povrchová úprava, jako například lakování, pokovování, atd. Plechové díly pro vybranou zkoušku byly zhotoveny z tabule plechu technologií stříhání. V normách je uvedeno, že by se měl pro zkoušky použít plech o tloušťce 1,6 mm, avšak z důvodu dostupnosti materiálu byl vybrán plech o tloušťce 1,5 mm.

Stříhání může být provedeno různými způsoby a na různých zařízeních. Stříhací zařízení mohou být hydraulicky, mechanicky nebo pneumaticky poháněné. Obecně tato metoda funguje na principu, že se zajistí stříhaný plech proti pohybu a poté pohyblivá horní čelist působící silou oddělí materiál od sebe.

Tato metoda byla zvolena z důvodu malé finanční náročnosti a téměř 100% využití materiálu bez zbytků. Střížná linie má v našem případě tvar přímky, v jiných situacích může mít tvar křivky. Plechové tabule se vyrábí válcováním ocelového polotovaru. Polotovar je postupně ztenčován až na požadovaný rozměr.

#### 3.2 Lepidlo Den Braven Unifix MS Polymer [10]

Jedná se o univerzální lepicí a těsnící tmel určený pro stavební a konstrukční účely. Možnost využití je široká, lze ho využít v domácnosti, pro spojování konstrukčních částí automobilů a dopravních prostředků. Lepidlo vytváří vodotěsné spoje. Přípravek je vhodný pro lepení korozivzdorné oceli, hliníku, mědi, olova, skla, keramických dlaždic, smaltu, zrcadel a zdiva.

Lepidlo je odolné proti povětrnostním vlivům, vodotěsné, mrazuvzdorné, odolává UV záření. Zachovává si trvale pružnost. vyznačuje se vysokou přilnavostí k savým i nesavým materiálům. Vhodné i na vlhké povrchy. Po vytvrzení lze lepidlo přetírat barvami. Nepůsobí korozivně na kovy.

Tepelná odolnost lepidla je od -40 °C do 90 °C po vytvrzení. Pevnost v tahu je 3,4 MPa. Aplikační teplota je 5-40 °C.

#### 3.3 Lepidlo WEICON Flex 310M HT200 [29]

Toto lepidlo je určeno pro výrobu kovových konstrukcí a nádrží, dále se využívá v klimatizační technice a při výrobě karoserií a kontejnerů. Je odolné proti vysokým teplotám, má vynikající odolnost proti stárnutí a je vysoce odolné vůči sladké i slané vodě. Vhodné je použití u konstrukcí, na které se nanáší vypalovací lak, díky teplotní odolnosti lepidla.

Lepidlo je bez rozpouštědel a bez zápachu, neobsahuje silikony, izokyanáty a halogeny. Možnost okamžitého přelakování, tzv. mokrý na mokrý. Po vytvrzení je lepidlo lehce přebrousitelné.

### 3.4 Tahové zařízení PROMI 3001

Přístroj PROMI je univerzální zkušební zařízení pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky. Zařízení se skládá z podstavy, v níž se ukrývá řídicí systém. Na horní části podstavy je umístěna pevná, nepohyblivá čelist. K podstavě je upevněn stojan s horní pohyblivou čelistí. Zařízení je dimenzováno pro zatížení maximální silou 3000 N. Pracovní zdvih zařízení je 450 mm. Posuv horní čelisti je zajištěn pomocí kuličkového šroubu a matice, připojené k elektrickému pohonu. Rychlost pracovního posuvu zařízení lze nastavit v rozsahu 0-750 mm/min. V zařízení je možno nastavit potřebné provozní parametry pomocí vestavěné klávesnice a displeje, kterým je přístroj opatřen. Pro měření maximální síly potřebné k přetržení zkušebního vzorku je použit digitální siloměr s rozsahem měření 0-3000 N.



Obr. 21 Tahové zařízení PROMI 3001

Postup měření zatěžovací síly na zařízení PROMI 3001 - zapne se zkušební zařízení a připojí se siloměr k čidlu upevněnému na horní čelisti, dále se zapne i siloměr. Na pracovním panelu přístroje se nastaví požadované parametry pro zvolený typ zatěžování. Za pomoci ručního posuvu se nastaví potřebná vzdálenost mezi čelistmi, aby bylo možné upnout vzorek. Vzorek se upne do samosvorných čelistí. Po upnutí a vyrovnaní vzorku do osy zatěžování lze provést vlastní tahovou zkoušku pomocí automatického chodu přístroje.

### 3.5 Návrh a provedení vybraných zátěžových zkoušek

Zkoušky lepených spojů byly navrženy pro ověření mechanických vlastností lepidel Den Braven unifix MS Polymer a WEICON Flex 310M HT200 aplikovaných na základní materiál z nízkouhlíkové oceli DC01. Získané výsledky stanovují pevnost lepeného spoje v průmyslovém využití.

Navrženy byly dvě zkoušky, a to zkouška pevnosti ve smyku a zkouška na odlup.

### 3.5.1 Zkouška pevnosti ve smyku

Pro první experiment byla vybrána zkouška pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465. Zatěžování zkušební vzorku statickým tahem bylo provedeno na již zmíněném zařízení PROMI 3001. Zatěžovací síla musí působit ve směru podélné osy vzorku. Vzorek musí být řádně upnut do samosvorných čelistí tahového zařízení a vyrovnán, aby nepůsobila žádná přídavná napětí.

Zkušební vzorek byl připraven z ocelového plechu z materiálu DC01 o tloušťce 1,5 mm. Šířka plechových pásků byla 25 mm a délka 130 mm. Velikost přeplátování spoje byla 12,5 mm.

Použité lepidlo pro spojení daných vzorků bylo Den Braven UNIFIX MS Polymer. Relativní vlhkost vzduchu při spojování vzorků byla 54%, teplota byla 22°C.

Vzhledem k tomu, že zkušební zařízení je schopno zaznamenávat pouze aktuální a maximální hodnotu zatěžovací síly, je nutno dopočítat napětí působící v lepeném spoji dle vzorce

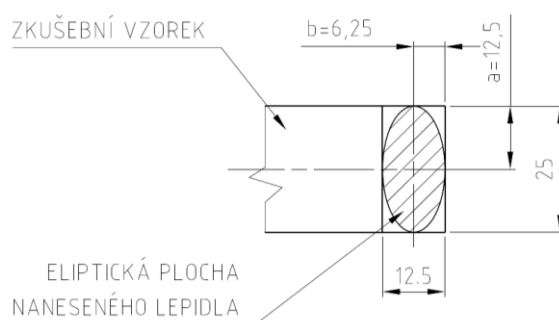
$$\tau_s = \frac{F_{ti}}{S_{\text{lepidla}}} \text{ [MPa]} \quad (3.1)$$

kde:  $\tau_s$  - smykové napětí v místě lepeného spoje,  
 $F_{ti}$  - maximální síla naměřená při zatěžování i-tého vzorku,  
 $S_{\text{lepidla}}$  - kontaktní plocha naneseného lepidla.

Vzhledem k tomu, že lepidlo na vzorcích nebylo rovnoměrně rozprostřeno po celé obdélníkové styčné ploše, ale bylo nanášeno a následně silou  $F_p=20$  N rozmáčknuto a rozprostřeno po kontaktní ploše, tvar naneseného rozmáčknutého lepidla byl eliptický, proto je uveden výpočet obsahu eliptické kontaktní plochy.

$$S = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot 12,5 \cdot 6,25 = 245,44 \text{ mm}^2 \quad (3.2)$$

kde:  $S$  - obsah elipsy [ $\text{mm}^2$ ]  
 $a$  - délka hlavní poloosy [mm]  
 $b$  - délka vedlejší poloosy [mm]



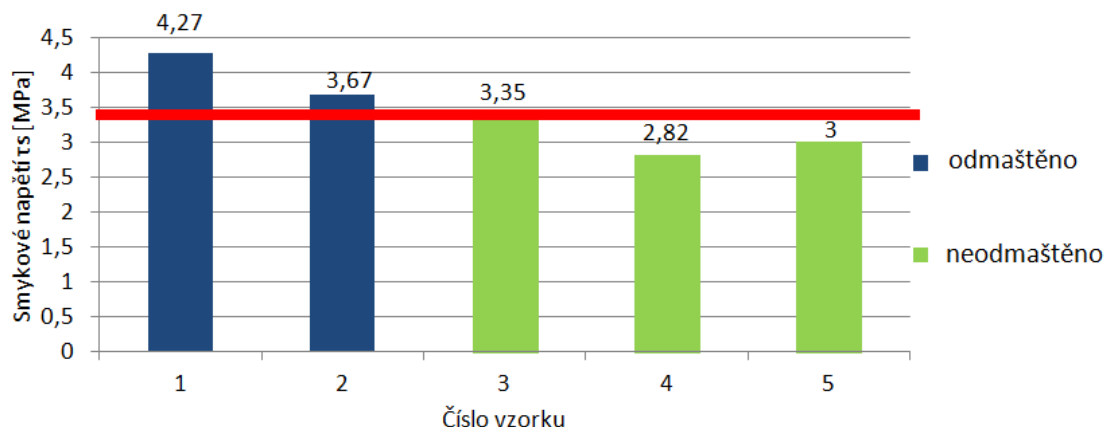
Obr. 22 Eliptická plocha naneseného lepidla

Z důvodu nepravidelnosti eliptického tvaru naneseného, rozmáčkutého lepidla je zaokrouhlena vypočtená hodnota plochy na 200 mm<sup>2</sup>. Tím je zajištěno, že vypočítané smykové napětí vyjde o něco vyšší, než bylo napětí skutečné, což zajistí vyšší bezpečnost skutečného spoje, který by byl navržen na základě této zkoušky.

V tabulce 2 je přehled naměřených výsledků ze zatěžování lepených spojů smykovým napětím. Experiment byl proveden na 5 vzorcích, z nichž 2 byly před lepením řádně odmaštěny technickým lihem a 3 zůstaly neodmaštěny. Cílem experimentu bylo zjistit jaký je rozdíl v naměřených hodnotách u odmaštěných a neodmaštěných vzorků.

Tab. 2 Výsledky zkoušky zatěžování smykovým napětím

Číslo vzorku	Tloušťka plechu [mm]	Stav povrchu	Maximální velikost tahové síly do porušení spoje [N]	Smykové napětí určené výpočtem [MPa]
1	1,5	odmaštěno	853,5	4,27
2	1,5	odmaštěno	734,5	3,67
3	1,5	neodmaštěno	669,5	3,35
4	1,5	neodmaštěno	564,5	2,82
5	1,5	neodmaštěno	599,5	3,00



Obr. 23 Porovnání velikostí napětí u odmaštěných a neodmaštěných vzorků

Z grafu na obrázku 23 je patrné, že vzorky, které byly před lepením odmaštěny technickým lihem (modré sloupce) mají vyšší pevnost ve smyku, než vzorky, které zůstaly neodmaštěny (zelené sloupce). Zároveň lze říci, že pokud je provedena správná povrchová úprava odpovídající normě ČSN EN 13887 nebo dle návodu výrobce před lepením, pak vzorky přenesou zatížení garantované výrobcem (v grafu červená linka). Rozdíl mezi vzorkem, který vydržel nejvyšší zatížení a vzorkem, který byl porušen při nejnižším naměřeném napětí je 1,45 MPa. Průměrná hodnota maximálního zatížení před poškozením u odmaštěných vzorků je 3,97 MPa. U neodmaštěných vzorků je průměrná hodnota zátěže rovna 3,05 MPa. Rozdíl průměrných zátěží mezi odmaštěnými a neodmaštěnými vzorky činí 23,2%.

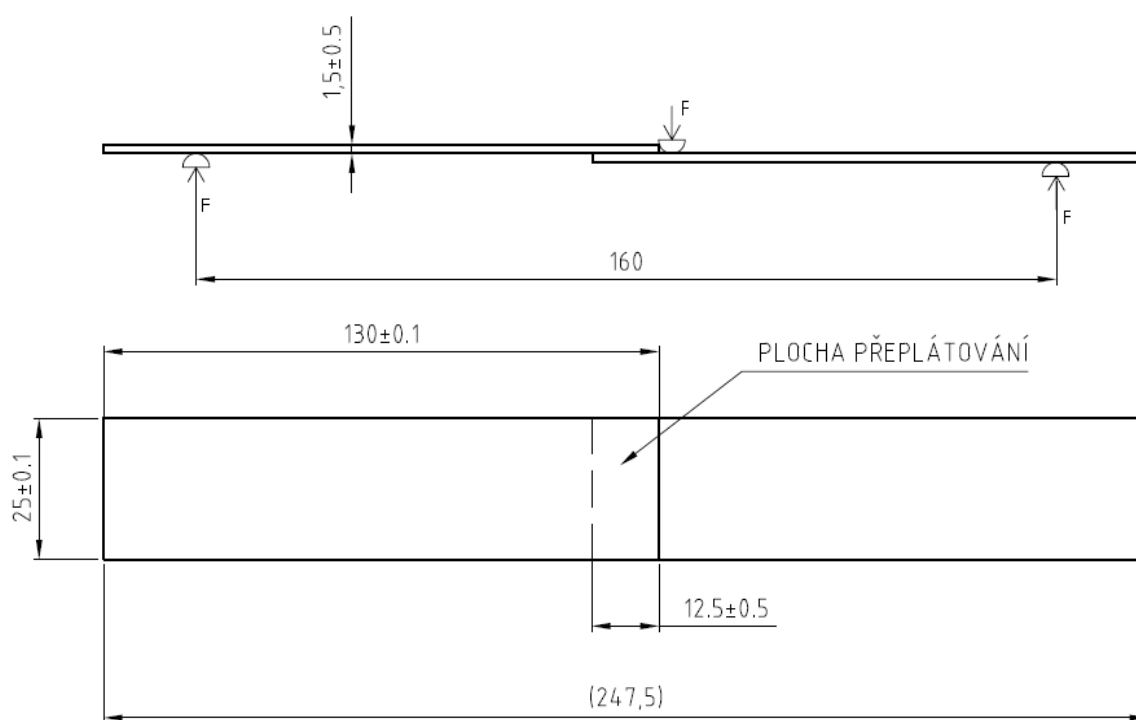
### 3.5.1 Zkouška lámavosti

Následujícím experimentem je zkouška lámavosti provedená na základě normy ČSN 66 8511 s upravenými roztečemi podpěr a působišťm zatěžovací síly, viz obrázek 24.

Zatěžování se provádí statickou ohybovou silou  $F_0$ , působící těsně vedle lepeného spoje. Při zatížení určitou silou vždy měříme průhyb vzorku v místě působení síly.

Vzorky byly připraveny z ocelového plechu z materiálu DC01 o tloušťce 1,5 mm. Šířka vzorku je 25 mm a délka je 130 mm. Šířka překlátování je 12,5 mm.

Lepidlo použité v tomto experimentu je WEICON Flex 310M HT200. Vytvrzuje při vzdušné vlhkosti bez smrštění.



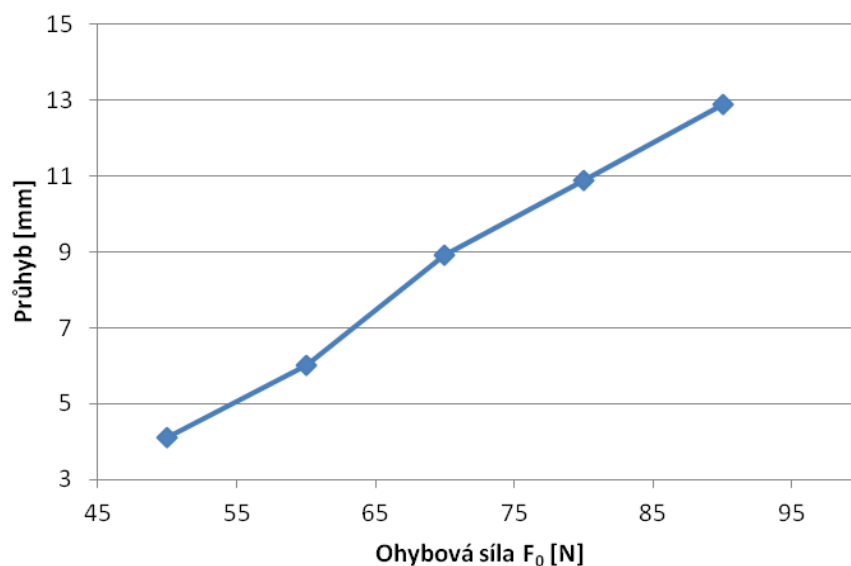
Obr. 24 Schéma uspořádání experimentu pro ověření lámavosti

Při prvním zatěžování byl měřen průhyb při zatěžující síle  $F_0=50$  N, při každém dalším měření průhybu bylo zároveň zvětšeno zatížení o 10 N. Síla byla zvětšována až do chvíle, kdy se vzorek přelomil. Výsledky měření průhybu v závislosti na zatěžující síle jsou zaznamenány v tabulkách 3 a 4.

Tab. 3 Výsledky ohybové zkoušky - neodmaštěný vzorek

Ohybová síla $F_0$ [N]	Průhyb [mm]
50	4,1
60	6,0
70	8,9
80	10,9
90	12,9
100	porušení spoje

Na obrázku 25 je sestrojena závislost průhybu vzorku na zatěžující síle pro neodmaštěný vzorek.



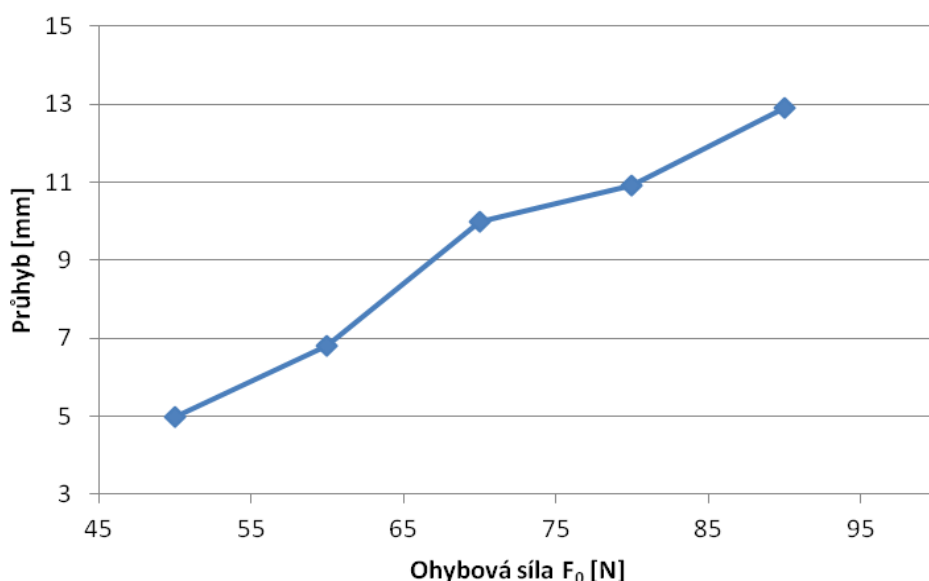
Obr. 25 Závislost průhybu na zatěžující síle u neodmaštěného vzorku

V tabulce 4 jsou zaznamenány hodnoty ze zkoušky lámavosti na vzorku, kde byl před lepením odmaštěn povrch technickým lihem.

Tab. 4 Výsledky ohybové zkoušky - vzorek odmaštěn technickým lihem

Ohybová síla $F_0$ [N]	Průhyb [mm]
50	5,0
60	6,8
70	10,0
80	11,9
90	13,9
100	porušení spoje

Na obrázku 26 je vykreslen průběh závislosti průhybu na zatěžující síle u vzorku, který byl odmaštěn technickým lihem před aplikací lepidla. Je patrné, že průběh je téměř lineární. K lomu došlo při zatížení ohybovou silou 100 N.



Obr. 26 Závislost průhybu na zatěžující síle u vzorku odmaštěného technickým lihem

Při porovnání výsledků průhybu odmaštěného a neodmaštěného vzorku je znát, že odmaštěný vzorek se při stejné hodnotě zatěžující síly deformuje o 7,2% více než vzorek neodmaštěný. Je patrné, že odmaštěný vzorek se poruší až při větší hodnotě průhybu než neodmaštěný vzorek. Při zatěžující ohybové síle 100 N byly porušeny oba dva vzorky, z čehož nelze určit, zda odmaštění povrchu má vliv na ohybovou pevnost spoje.

Směrodatná odchylka z naměřených hodnot u neodmaštěného vzorku je 3,57 mm. U odmaštěného vzorku technickým lihem je tato odchylka rovna 3,18 mm.

Průběh křivky závislosti průhybu na zatěžovací ohybové síle je v obou případech téměř lineární s jistými odchylkami, které mohou být způsobeny nepřesností odečtu průhybu. Sklon křivky u odmaštěného vzorku je pozvolnější než u neodmaštěného vzorku. Je to zároveň dáno i velikostí směrodatných odchylek.



## 4 ZÁVĚRY

V bakalářské práci je vytvořen přehled zatěžovacích zkoušek pro testování plechů spojených technologií lepení. Byla využita odborná literatura a dostupné technické normy. V experimentální části se zadaným výběrem materiálů a lepidel byly uskutečněny testy na smyk a lámavost.

Byly popsány základní technologie bodového spojování tenkých plechů. Technologie lepení byla rozebrána podrobněji, byly uvedeny výhody a nevýhody lepených spojů. Dále byla rozebrána příprava povrchů nutná pro provedení lepených spojů. Dále byl uveden přehled nejčastějších druhů poškození lepených spojů.

V experimentální části bakalářské práce pro lepení plechů a jejich testování byly navrženy dvě zkoušky. Zkouška pevnosti ve smyku a zkouška lámavosti. Zkouška pevnosti ve smyku byla provedena na základě normy ČSN EN 1465 (66 8510). Zkouška lámavosti byla provedena s přihlédnutím k normě ČSN 66 8511 a modifikována dle možností a laboratorního příslušenství a dle potřeb pro bakalářskou práci.

Obě navržené zkoušky byly provedeny v laboratorním prostředí, kde byl sledován celý průběh experimentu, od lepení plechů k sobě až po provedení zkoušek.

Pro zkoušky byla vybrána lepidla, která splňují nároky na jednoduchou manipulaci a nároky na BOZP.

Na základě zkoušky pro ověření pevnosti ve smyku bylo zjištěno, že pokud jsou plechy před lepením vhodně připraveny dle doporučení výrobce a normy ČSN EN 13887, pak vydrží zatížení ve smyku garantované výrobcem lepidla. Napětí uváděné výrobcem, kterému lepený spoj odolá je 3,4 MPa. Průměrná hodnota napětí, při kterém vhodně připravené a odmaštěné vzorky praskly byla o 14,4% vyšší než je hodnota uváděná výrobcem. Hodnoty napětí při porušení spoje u neodmaštěných vzorků byly nižší než je hodnota udávaná výrobcem.

Zkouška lámavosti ukazuje, že odmaštěný vzorek se při stejných hodnotách zatěžující ohybové síly deformuje přibližně o 7,2% více, než neodmaštěný vzorek. Oba vzorky byly porušeny při zatížení silou  $F_0=100$  N. Průběh křivek závislosti průhybu na zatěžující síle je u obou případů téměř lineární.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ALFUN Metal Service Center. *ALFUN - Ocel* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/ocel>
2. Aplikace lepidla v automobilovém průmyslu. In: *WATECH* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.wagnergroup.cz>
3. Clinch [online]. 2007 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: [http://www.sorrex.fi/kat/kat2\\_2puklevka.html](http://www.sorrex.fi/kat/kat2_2puklevka.html)
4. ČSN EN 13887 (668517): *Konstrukční lepidla - Směrnice pro přípravu povrchu kovů a plastů před lepením*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
5. ČSN EN 1465: *Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
6. ČSN EN 15870: *Lepidla - Stanovení pevnosti tupých spojů v tahu*. Česká technická norma, 2009.
7. ČSN EN 28510-1: *Lepidla - Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu - Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů (ISO 8510-1:1990)*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
8. ČSN EN ISO 11339-2010 *Lepidla - T-zkouška v odlupování slepů z ohebných adherendů*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
9. ČSN EN ISO 9664: *Lepidla - Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
10. Den Braven Unifix MS Polymer [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.denbraven.cz/ms-polymerni-lepidla-a-tmely/0441-ms-unifix-na-vsechna-tmeleni-a-lepeni-51-cz5.html>
11. ISO 8510-2:2006: *Adhesives -- Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly -- Part 2: 180 degree peel*. 2. International Organization for Standardization, 2006.
12. ISO 9664:1993: *Adhesives -- Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear*. 1. International Organization for Standardization, 1993.
13. SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Czech Edition. Brno: VUTIUUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
14. PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980, 792 s. ISBN L13-E1-IV-31f/22472.

15. ČSN EN ISO 9664. *Lepidla - Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem*. Pardubice: SYNPO, 1997.
16. VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
17. *Nýtové spoje*. In: *Učíme v prostoru 3D* [online]. 2016 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP\\_STROJ\\_ST22\\_006\\_003.jpg](http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST22_006_003.jpg)
18. *Obrázek lepených částí karoserie* [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12-doplnkove%20technologie/11-lepene%20spoje.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12-doplnkove%20technologie/11-lepene%20spoje.jpg)
19. *Odporové svařování*. Schinkmann [online]. 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
20. ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 10/1995. Pardubice: SYNPO, 1995.
21. *Pájení na měkko* [online]. 2013 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.bydleni.cz/zprava/Jak-spravne-pajet-pajeni-namekko-titanzinku-RHEINZINK>
22. HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra: Obecné strojní části I*. Praha: Computer press, 1999, 313 s. ISBN 80-7226-055-3.
23. *Samovrtný šroub* [online]. SEO Partneři Eshop [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.stresnicentrum-eshop.cz/samorezne-srouby/530-samovrtny-sroub-do-dreva-sdt-s-epdm-satjam-48-x-60-mm.html>
24. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.
25. *Schéma lepeného spoje* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/12-doplnkove%20technologie/12-princip%20lepeneho%20spoje.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12-doplnkove%20technologie/12-princip%20lepeneho%20spoje.jpg)
26. *Šroubový spoj* [online]. <http://uvp3d.cz>, 2014 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP\\_STROJ\\_ST22\\_002\\_002.jpg](http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST22_002_002.jpg)
27. *Technický portál: Flowform* [online]. 2014 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/zpravodajstvi-tt/srouby-flowform-prinaseji-znacne-vyhody\\_24683.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/zpravodajstvi-tt/srouby-flowform-prinaseji-znacne-vyhody_24683.html)

28. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
29. *WEICON Flex M HT200* [online]. 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.weiconcz.cz/nase-produkty/lepidla-a-tesneni/elasticcka-lepidla/flex-310-m/flex-310m-ht-20>
30. ZEDNÍČEK, Z. *Testování lepených ocelových plechů s povlakem zinku*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 56 stran a 4 přílohy, CD. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	Délka hlavní poloosy elipsy	[mm]
b	Délka vedlejší poloosy elipsy	[mm]
F	Zatěžující síla	[N]
F <sub>0</sub>	Ohybová síla	[N]
F <sub>ti</sub>	Maximální síla u i-tého vzorku	[N]
S	Obsah elipsy	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>lepidla</sub>	Kontaktní plocha naneseného lepidla	[mm <sup>2</sup> ]
τ <sub>s</sub>	Smykové napětí	[MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip lepeného spoje .....	10
Obr. 2 Samovrtný šroub .....	11
Obr. 3 Šroubové spojení .....	12
Obr. 4 Flowform tvářecí šroub .....	12
Obr. 5 Ukázka nýtových spojů .....	12
Obr. 6 Schéma bodového svařování .....	13
Obr. 7 Pájení tenkých plechů .....	13
Obr. 8 Princip clinchování .....	14
Obr. 9 Aplikace lepidla v automobilovém průmyslu .....	14
Obr. 10 Uplatnění lepidel a tmelů v konstrukci osobního automobilu .....	16
Obr. 11 Spoj na tupo se zkosením .....	17
Obr. 12 Spoj s přeplátováním přes sebe.....	17
Obr. 13 Spoj s oboustranným přeplátováním.....	17
Obr. 14 Vzorek pro T-zkoušku na odlup .....	19
Obr. 15 Náčrt zkušební vzorku.....	20
Obr. 16 Schéma zkušební vzorku s T-součástí .....	21
Obr. 17 Schéma vzorku pro zkoušku na odlup pod 180° .....	22
Obr. 18 Vzorek pro zkoušky pevnosti ve smyku .....	23
Obr. 19 Vzorek a uspořádání zkoušky lámavosti [14].....	24
Obr. 20 Kombinované porušení spoje AF (50%)+CF (50%) .....	24
Obr. 21 Tahové zařízení PROMI 3001 .....	27
Obr. 22 Eliptická plocha naneseného lepidla.....	28
Obr. 23 Porovnání velikostí napětí u odmaštěných a neodmaštěných vzorků .....	29
Obr. 24 Schéma uspořádání experimentu pro ověření lámavosti .....	30
Obr. 25 Závislost průhybu na zatěžující síle u neodmaštěného vzorku.....	31
Obr. 26 Závislost průhybu na zatěžující síle u vzorku odmaštěného technickým lihem.....	32

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Označení typů porušení [20].....	25
Tab. 2 Výsledky zkoušky zatěžování smykovým napětím.....	29
Tab. 3 Výsledky ohybové zkoušky - neodmaštěný vzorek.....	30
Tab. 4 Výsledky ohybové zkoušky - vzorek odmaštěný technickým lihem.....	31